

固体推进剂整形过程工艺安全性的有限元分析

李 军, 赵孝彬, 王晨雪, 关红波, 程立国, 程新丽, 王 宁

(航天工业固体推进剂安全技术研究中心, 湖北 襄樊 441003)

摘 要:为分析固体推进剂整形过程中的危险点,采用热-机械耦合对固体推进剂整形过程进行了模拟分析,基于固体推进剂药柱的黏弹性本构关系,揭示了整形过程中由于整形刀具挤压、摩擦引起的温度变化规律,计算了危险点。结果表明,固体推进剂整形温度随整形速度的增加而增加,当整形速度为10mm/s时,整形温度最高可达65℃;当整形厚度为1.0、1.5和2.5mm时,整形过程中的最高温度变化不明显。固体推进剂整形过程中的危险点出现在刀刃刚刚经过的药屑面上,而非刀具的刀刃上。

关键词:材料科学;固体推进剂;整形工艺;安全性;有限元

中图分类号: TJ55;O642

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2009)06-0087-04

Safety Analysis on Truing Process of Solid Propellant by Finite Element Method

LI Jun, ZHAO Xiao-bin, WANG Chen-xue, GUAN Hong-bo,

CHENG Li-guo, CHENG Xin-li, WANG Ning

(Research Center of Solid Propellant Safety Technology of Aerospace Industry, Xiangfan Hubei 441003, China)

Abstract: In order to study the hazard point of truing process, the truing process of solid propellant was predicted by a thermal-mechanical coupled finite element method. Based on the viscoelastic integral constitutive relation, the rules of temperature response of truing process caused by pressure and friction were obtained, and the hazard point was calculated. The results showed that the temperature in solid propellant truing process increases with increasing of truing velocity, and the maximum temperature in solid propellant truing process could attain up to 65℃ when the truing velocity was 10mm/s. There was no remarkable temperature change for the maximum temperature under the truing thickness of 1.0mm, 1.5mm and 2.5mm. The hazard area in truing process was on the surface of solid propellant scraps rather than the cutter edge.

Key words: material science; solid propellant; truing; safety; finite element

引 言

随着导弹武器对固体推进剂能量性能要求的不断提高,固体推进剂中添加大量的高能炸药(如HMX、RDX等),同时为了提高燃速,在固体推进剂中添加了多种燃速催化剂(如二茂铁、卡托辛等)^[1-2],且药型也越来越复杂,使固体推进剂的整形难度和危险系数大大增加。通过对国内外固体推进剂事故进行统计,整形过程事故率高达28%^[3]。为了保证固体推进剂整形过程的安全,国内外固体推进剂研制和生产单位开展了大量的工作,但是由于整

形过程安全性研究的复杂性,至今仍以经验式安全防护为主,一般通过刀具接地避免静电产生,采用机械整形避免发生危险后造成人员伤亡等。经验式的安全防护在固体推进剂研制生产中起到一定的作用,但是不能提高固体推进剂整形过程的本质安全度,因此,如何找出固体推进剂整形工艺过程中的危险点,以及为固体推进剂整形过程提供关键安全参数将是今后研究的重点。

本研究以丁羟推进剂为研究对象,采用有限元法研究了整形过程中刀具在不同速度以及不同厚度条件下切削温度的变化规律,分析了整形过程中的危险点。

收稿日期:2009-09-24; 修回日期:2009-10-15

作者简介:李军(1981-),男,工程师,从事固体推进剂安全性能研究工作。

1 物理模型及计算方法

1.1 黏弹性模型

固体推进剂是一种以黏合剂母体为基体的高填充固体黏弹材料,其力学性能对时间和温度具有强烈的依赖关系,为了方便计算,假设固体推进剂为均匀各向同性材料,应力应变呈线黏弹性关系^[3-7]。

$$S_{ij}(t) = 2 \int_{-\infty}^t G(t-\tau) \frac{d\epsilon_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}(t) = 3 \int_{-\infty}^t K(t-\tau) \frac{d\epsilon_{kk}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

式中: $G(t)$ 和 $K(t)$ 分别为剪切模量和体积模量。

松弛模量 E 与泊松比 μ 的本构方程:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t E(t-\tau) \frac{d\epsilon_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau - \int_{-\infty}^t \mu(t-\tau) \frac{d\sigma_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau + \delta_{ij} \int_{-\infty}^t \mu(t-\tau) \frac{d\sigma_{kk}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3)$$

为了简化计算,假设固体推进剂泊松比与时间和温度无关。本构方程简化为:

$$\{\sigma(t)\} = \int_{-\infty}^t E(\xi - \xi) A \frac{\partial \{\epsilon\}}{\partial \tau} d\tau \quad (4)$$

剪切模量 $G(t)$ 采用 Prony 级数表示:

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^m G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (5)$$

固体推进剂在不同温度下的松弛模量曲线如图 1 所示,固体推进剂时-温等效因子采用 Williams-Landel-Ferry 公式计算:

$$\lg a_t = \frac{-15.029(T - T_{ref})}{182.86 + T - T_{ref}} \quad (6)$$

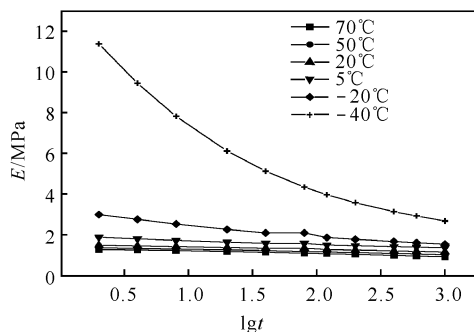


图 1 不同温度下固体推进剂的力学性能曲线
Fig. 1 Curves of mechanical performance of solid propellant under different temperatures

1.2 固体推进剂的材料属性

固体推进剂的材料参数为^[8]:导热系数 $0.59 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k}^{-1})$,比热 $1.2561 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{k}^{-1})$,密度 $1.74 \text{ g}/\text{cm}^3$,线膨胀系数 $0.652 \times 10^{-4} \text{ k}^{-1}$,泊松比 0.49 。

1.3 固体推进剂整形过程的物理模型

固体推进剂整形过程是一个动态过程,开始整形时温度急剧上升且在很短的时间内达到平衡,此时,切削温度基本保持稳定^[9]。为此,本研究选择整形刀具前方区域作为研究对象,因整形的厚度远远小于固体推进剂肉厚,且假定整形过程处于平面应变状态。采用的模型长度和宽度分为 15 和 10 mm ,采用四节点等参数单元,且假设刀具为理想刚体,不考虑刀具的变形。有限元模型如图 2 所示。

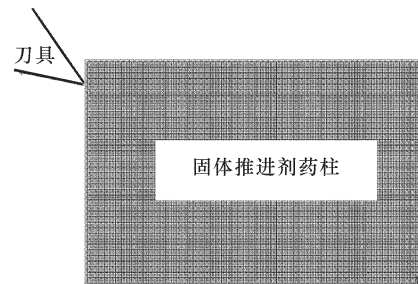


图 2 固体推进剂整形工艺过程的有限元模型

Fig. 2 Finite element model for truing process of solid propellant

1.4 固体推进剂整形过程受力分析

Z. C. Lin 等人研究结果表明^[9],整形单元和整形刀具前刀面之间的接触区域分为滑动区和粘着区,在粘着区,刀具与试样之间存在非常大的挤压应力,而在滑动区存在很大的摩擦应力。

1.5 固体推进剂整形过程热传导分析

固体推进剂整形过程中的热源主要来源于两个方面:一是整形过程中的弹性转化(粘着区),二是刀具与固体推进剂表面的摩擦生热(滑动区),二者分别表示如下^[6]:

$$Q_p = \sigma_e \bar{\epsilon} / J \quad (7)$$

$$Q_f = f \cdot v_r / J \quad (8)$$

式中: σ_e 为等效应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变率; J 为热功当量系数; v_r 为两接触面的相对滑动速度。

2 结果与讨论

2.1 整形过程中危险点的确定

图 3 给出整形速度为 $1 \text{ mm}/\text{s}$ 时固体推进剂药柱的温度变化情况。通过图 3 可以看出,整形速度为 $1 \text{ mm}/\text{s}$ 时,固体推进剂在很短时间达到温度平衡,且最大温度点出现在刀具刚刚经过的药屑面,而非在整形刀具的刀尖。主要原因是由于固体推进剂药屑与刀具之间的摩擦所致,刀具前刃局部区域的温度在数秒内达到最高,另外,药屑的塑形变形也是导

致温度上升的原因。因此, 固体推进剂刀刀前端是整形过程中最危险的区域。

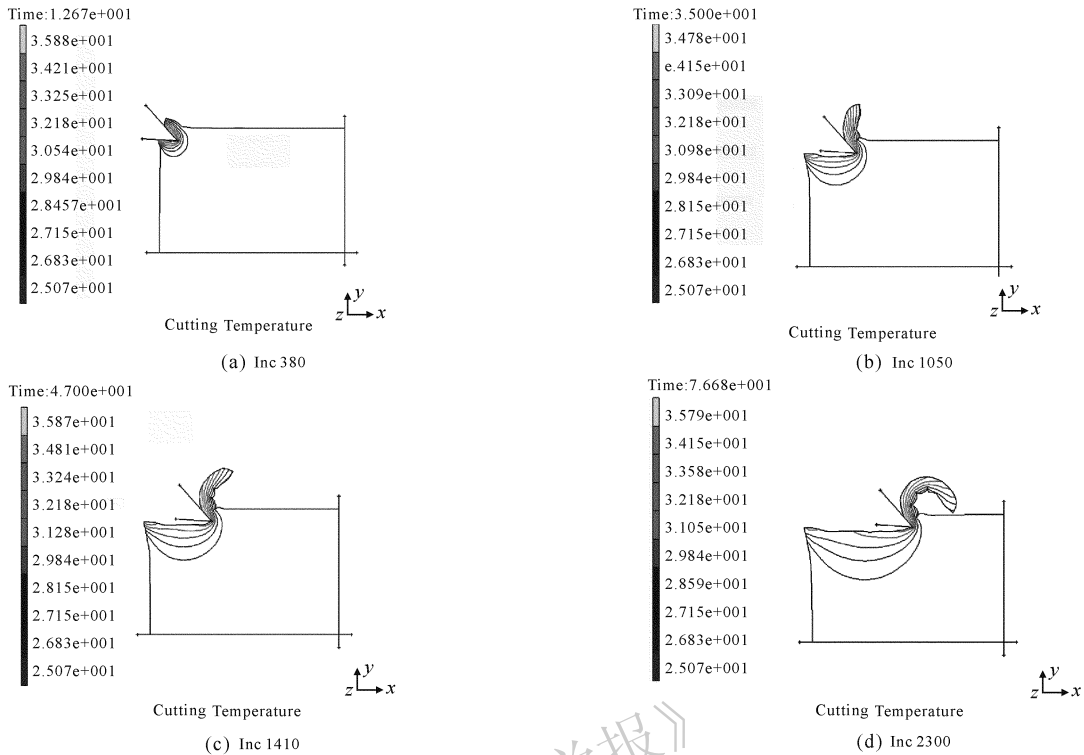


图 3 固体推进剂整形过程温度分布等值线图

Fig. 3 Equivalent line for temperature distribution of solid propellant in the truing process

2.2 整形速度与推进剂温度之间的关系

图 4 给出了整形速度为 1、5 和 10 mm/s 条件下最高温度随整形过程的变化情况。由图 4 可以看出, 在整形速度为 1 mm/s 时, 温升效应并不明显, 平衡状态下固体推进剂的最高温度在 35℃ 左右; 当整形速度为 10 mm/s 时, 整形温度高达 65℃。

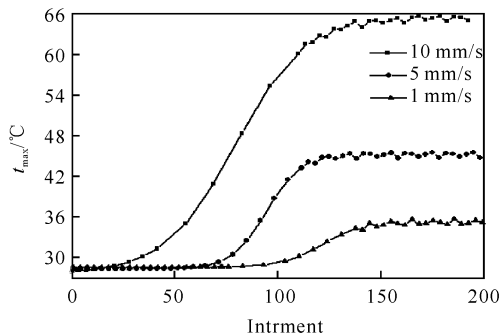


图 4 不同整形速度下最高温度的变化

Fig. 4 Change of the highest temperature under different velocity in truing process

2.3 整形厚度与推进剂温度之间的关系

图 5 给出了整形厚度为 1.0、1.5 和 2.5 mm 条件下最高温度的变化情况, 通过图 5 可以看出, 伴随着整形厚度的增加, 固体推进剂药柱的最高温度呈上升趋势, 但是上升的幅度不大, 相差约 1℃。

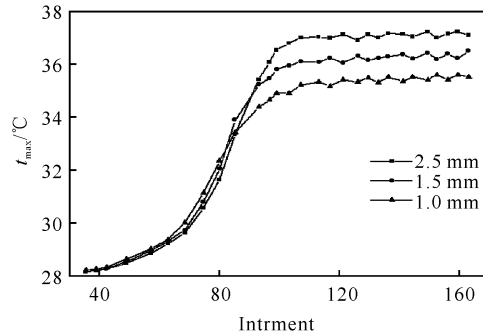


图 5 不同整形厚度下最高温度的变化

Fig. 5 Change of the highest temperature under different thickness in truing process

3 结 论

(1) 确定了固体推进剂整形过程中的危险点, 即温度最高点出现在刀具刚刚经过的药屑面, 而非在整形刀具的刀尖。

(2) 固体推进剂的整形温度伴随着整形速度的增加而增加, 当整形速度为 10 mm/s 时, 整形温度最高可达 65℃。

(3) 固体推进剂整形厚度分别为 1.0、1.5 和 2.5 mm 时, 推进剂药柱的最高温度相差约 1℃, 温度

变化不明显。

参考文献:

- [1] 付小龙,樊学忠,李吉祯,等. 有机铅盐对高能改性双基推进剂燃烧性能和热分解的影响[J]. 火炸药学报, 2008,31(2):49-52.
FU Xiao-long, FAN Xue-zhong, LI Ji-zhen, et al. Effect of organic lead salts on combustion characteristics and thermal decomposition of high energy modified double base propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(2): 49-52.
- [2] 张维,李杰,李晓萌,等. 纳米燃速催化剂对 7-氨基-6-硝基-4,5-二氧化咪唑热分解的影响[J]. 火炸药学报, 2004,27(2):48-51.
ZHANG Wei, LI Jie, LI Xiao-meng, et al. Effect of nano-catalysts on thermal decomposition of aminitrobenzordifuroxan [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2004, 27(2): 48-51.
- [3] Boggs T L, Atwood A I, Lindfors A J, et al. Hazard Associated with Solid Propellant [M]. New York: AIAA, 2000.
- [4] Lee E H, Shaffer B W. The theory of plasticity applied to a problem of machining [J]. J Appl Mech, 1951, 18: 405-413.
- [5] Chandrakanth S, Deng X M. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105: 95-109.
- [6] Ceretti E, Fallbohmer P, Wu W T, et al. Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59: 169-180.
- [7] 侯林法. 固体推进剂 [M]. 北京: 宇航出版社, 1994: 218-286.
- [8] 徐新琦, 于胜春. 固化降温过程中推进剂药柱的瞬态响应分析 [J]. 固体火箭技术, 2004(3): 180-183.
XU Xin-qi, YU Sheng-chun. Transient temperature and stress analysis of propellant grains during cooling process after curing [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004(3): 180-183.
- [9] Lin Z C, Lin S Y. A coupled finite element method of thermo-elastic-plastic large deformation for orthogonal cutting [J]. J Eng Mater Technol, 1992, 114(2): 218-226.
- (上接第 74 页)
- components of red water, ADA034226 [R]. Springfield: NTIS, 1976.
- [2] Mahannah J. Technology evaluation for treatment/disposal of TNT red water, AD-A244 873 [R]. Springfield: NTIS, 1990.
- [3] 鲁志远, 李玉平, 牟敬海, 等. 湿式氧化法处理 TNT 红水 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(3): 48-51.
LU Zhi-yuan¹, LI Yu-ping¹, MU Jing-hai, et al. Treatment of TNT red water by wet oxidation [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007, 30(3): 48-51.
- [4] 张铸勇. 精细有机合成单元反应 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2006: 98-99.
- [5] 尹冬冬. 有机化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 124-125.
- [6] 天津大学有机化学教研室. 有机化学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1970: 109.
- [7] 吕春绪. 间硝基甲苯的深加工及其工程化技术 [J]. 精细化工中间体, 2006, 36(6): 1-4.
Lü Chun-xu. Synthesis and industrialization of *m*-nitrotoluene derivatives [J]. Fine Chemical Intermediates, 2006, 36(6): 1-4.
- [8] 王昌皇. 邻硝基甲苯产品开发与应用 [J]. 湖北化工, 1986(4): 44-18.
- [9] 湖南省化工技术情报中心站. 谈谈对硝基甲苯的利用途径 [J]. 精细化工中间体, 1977(3): 65-73.